

赤外線によるエンジン燃焼室内ガス温度の計測 （赤外線検出器の校正とエンジンへの適用）

長瀬慶紀¹⁾・長友宏昌²⁾・友松重樹³⁾・木村正寿⁴⁾

Measurement of Gas Temperature in Engine by Infrared Radiation (Calibration of IR Detector and Application to Measurement of Burnt Gas Temperature in Engine)

Yoshinori NAGASE, Kousuke NAGATOMO, Shigeki TOMOMATSU, Masatoshi KIMURA

Abstract

Gas temperature in the combustion chamber is used to calculate a coefficient of heat transfer on the combustion chamber wall. However, generally the temperature of the gas is calculated from pressure by the first law of thermodynamics. It is thought that the true gas temperature close to the wall is lower than the calculated temperature. First of all, it is necessary to calibrate the infrared detector. The density of in-cylinder gas changes with crank angle. The gas is reproduced to gas density same as a state of ATDC30, 47 and 59 degrees of the engine in combustion vessel of constant volume. Density and relations of the radiant quantities are led using the infrared radiant quantities being in proportion to density and enabled temperature measurements from ATDC30 to 59 degrees. Next, infrared detector was installed to an engine, and the gas temperature close to the wall surface was measured. The measurement values are near to calculated temperature from pressure. Therefore it is able to use the gas temperature obtained from the pressure to calculate the coefficient of heat transfer.

Key words:

Infrared Radiation, Gas temperature, Engine, Calibration, Measurement

1. はじめに

現在、地球環境保全が強く叫ばれており、環境負荷を軽減させようと様々な研究が行われている。特に普及率の高いガソリンエンジンやディーゼルエンジン等の内燃機関の高効率化を図ることは重要である。内燃機関の性能に期待されることは、より少ない燃料で高出力かつ排気ガスによる環境負荷が少ないことである。

有用な熱エネルギーは燃焼室壁面から逃げていくため、

- 1) 機械システム工学科准教授
- 2) 機械システム工学専攻大学院生
- 3) 機械システム工学科助教
- 4) 宮崎大学技術職員

効率を向上させるためには熱の逃げを知る必要があり、燃焼ガスから燃焼室壁面への熱伝達率を知ることは熱効率の向上に繋がると言える。しかし、熱伝達率を知るためには燃焼ガス温度を知る必要があるが、高温かつ、温度変化の激しいガス温度を計測することは困難である。そのため、一般的にガス温度は燃焼室内の圧力データから算出を行っている。これは、燃焼室内に旋回流が発生することにより燃焼室内ガスが一様の温度になっていると仮定していることと言える。しかし、燃焼室内のガス温度が一様であると確認されていない。

そこで、本研究では、赤外線検出器を用いた非接触型温度計に着目し、赤外線検出器による壁面近傍ガス温度計測を目的とする。赤外線検出器は時間分解能が高く、急激な

温度変化に対応でき、あらかじめ赤外線検出器が出力する燃焼ガス温度に応じた出力電圧を調べておくことで高温のガス温度も計測することができる。しかし、赤外線検出器を実際にエンジンに取り付けてガス温度計測を行った事例は少なく、ガスふく射の問題や赤外線放射量が計測体積内の分子量に応じて変化することから状態変化の激しい燃焼室内部のガス温度計測は困難であり、いまだ赤外線によるガス温度計測法は確立されていない。そこで、本研究ではエンジンの特定クランク角度の燃焼状態を定容容器で再現し、燃焼時の赤外線放射量を測定することでガス温度に応じた赤外線出力電圧を調査し温度校正を行う。さらに、試験用エンジンに赤外線検出器を取り付け燃焼室内の壁面燃焼ガス温度計測を行うことを目的とする。

2. 赤外線放射温度計の校正実験

赤外線の放射量は計測体積内の分子量、組成により変化するが、エンジン内部では膨張、圧縮を繰り返しており、ガス分子密度がクランク角度毎に変化している。そのため、赤外線検出器を校正するためには、特定のクランク角度でのエンジン内部のガス密度を校正用定容燃焼容器内で再現し、そのガス密度状態での温度を校正する必要がある。

2.1 校正実験装置

図1に実験装置概略図を示す。実験装置は校正用定容燃焼容器、赤外線検出器ユニットで構成され、燃焼容器内の燃焼ガスから発せられた赤外線が容器上部に取り付けられた赤外線検出器に集光するように設置してある。これにより、赤外線検出器には校正用定容燃焼容器内の円柱形状の計測体積内に含まれる燃焼ガスの垂直放射のみ検出さ

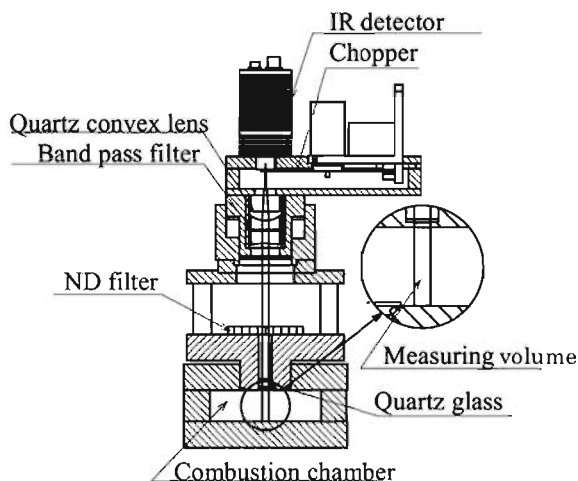


図1 校正実験装置概略図

れる。

以下に赤外線検出ユニット、校正用定容燃焼容器の説明を行う。

(1) 赤外線検出ユニット

赤外線検出ユニットは赤外線検出器、バンドパスフィルタ、チョッパから構成されている。

① 赤外線検出器 本実験で使用した赤外線検出器は InAs 光起電力素子であり、光が入射すると光起電力が発生するものである。平凸レンズを用いて入射光が赤外線検出器検出面に集光するように設置した。

② バンドパスフィルタ ガスからの赤外線放射量は膨大であるため、計測波長を限定し放射量を抑えて計測を行う。そのために、ガスふく射¹⁾、大気の窓²⁾、検出器の感度を考慮して中心波長 2100nm のバンドパスフィルタを光路に挟むことでその波長のみを検出した。

また、光路中に ND フィルタを挟むことで光量をさらに 2 分の 1 にカットした。

③ チョッパ 本研究で使用する InAs 光起電力素子の出力は入射する赤外線強度の変化に応じた出力電圧が出るため、検出器に入射する赤外線を周期的に遮断する必要がある。そこで、チョッパとよばれる遮光板を用いて検出器に赤外線が入射する時間と入射しない時間を作ること、放射量に応じた電圧を出力させている。

(2) 校正用定容燃焼容器

校正用定容燃焼容器の概略図を図2に示す。容器の燃焼室形状は内径 85mm、高さ 24mm の円筒状となっており、燃焼室上部には窓材として透過率の高い合成石英を設置した。また、燃焼室底面には吸気バルブが設置してあり、ステッピングモータにより開閉を制御している。容器側面には燃料供給用バルブが取り付けられてあり、マイクロシリンジによるガソリンの供給ができる。供給したガソリンを気化させるために燃焼室内の空気温度は 67°C に保たれており、その温度管理を行うために熱電対を設置した。

2.2 校正実験方法

マイクロシリンジを用いて燃焼室内にガソリンを供給する。ガソリンが十分に気化したと考えられる 30 秒後、ステッピングモータの駆動スイッチを入れる。ステッピングモータが回転し、それに取り付けられたカムが回転することで吸気バルブが押し上げられ、吸気ポートで加圧された空気が燃焼室内に吸気される。吸気バルブにはシュラウドが取り付けられてあり、旋回流を発生させることで吸気した空気と気化したガソリンを均一に混合させている。これによりエンジンのガス密度状態を再現している。

吸気バルブが閉まると同時に点火プラグにより点火し燃焼が始まる。点火と同時に圧力、赤外線検出器出力電圧の計測が開始される。

2.3 校正実験条件

校正用定容燃焼容器内で再現するガス密度はエンジン内のガス組成が一定となる燃焼終了後の ATDC30°、47°、59°の3条件で実験を行う。またエンジンの燃焼状態に合わせ、空燃比には理論空燃比である15として実験を行う。

計測点は図2に示すように燃焼室を13分割した体積の中心位置とする。外側の計測点では、隣り合う計測点において温度差がないものとして計測点⑦、⑨、⑪、⑬を除く9箇所で計測を行う。9か所で計測した平均出力と圧力データから算出した平均ガス温度から最小二乗法により温度式を算出する。

2.4 温度校正式作成

温度変化に対する完全放射体の分光放射強度 $L(\lambda, T)$ は、近似式として以下のように示される³⁾。

$$L(\lambda, T) = kT^n \quad (2-1)$$

分光放射強度と赤外線検出器出力は比例関係にあるため、 $L(\lambda, T)$ を検出器出力 E に置き換えると次式で表わされる。

$$T = \left(\frac{E}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-2)$$

圧力計から求めた平均ガス温度 T_p は各13計測地点の温度

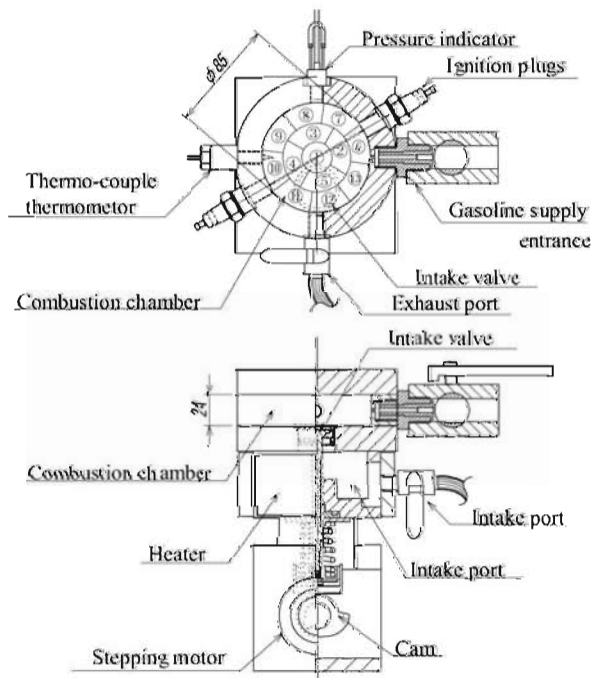


図2 校正用定容燃焼容器概略図

平均と等しくなるため、各計測地点で計測した赤外線検出器出力を式(2-2)により換算し平均ガス温度を求めると以下の式となる。

$$T_p = \frac{1}{13} \sum_{i=1}^{13} \left(\frac{E_i}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-3)$$

式(2-3)が成立する定数 k と指数 n を最小二乗法により求めることで温度と赤外線検出器出力の校正式を作成した。式(2-4)、(2-5)、(2-6)に求めた各条件での校正式を示す。また、校正曲線を図3に示す。

$$ATDC 30^\circ \quad E = 4.95 \times 10^{-16} T^{4.79} \quad (2-4)$$

$$ATDC 47^\circ \quad E = 1.68 \times 10^{-15} T^{4.62} \quad (2-5)$$

$$ATDC 59^\circ \quad E = 3.73 \times 10^{-15} T^{4.50} \quad (2-6)$$

この結果が各クランク角度条件での校正式であり、得られた赤外線出力から温度換算が可能となった。

3. エンジンによるガス、壁面温度、熱流束計測

3.1 実験装置

(1) ガス温度計測装置

エンジン燃焼室内のガス温度計測実験の装置概略図を図4に示す。ガス温度は赤外線検出器をエンジンに取り付けて計測する。エンジンは空冷4サイクル単気筒エンジンを実験用に改造したもので、供試機関諸元を表1に示す。

計測は吸気バルブ側壁面と排気バルブ側壁面の2箇所で行うため、シリンダライナ壁面に赤外線検出器を設置できるようにシリンダライナ部を加工している。

(2) 壁面温度計測装置

壁面温度計測には、薄膜型熱電対を用いて計測を行う。本研究で製作し使用した熱流束計の基本構造はS45Cとニ

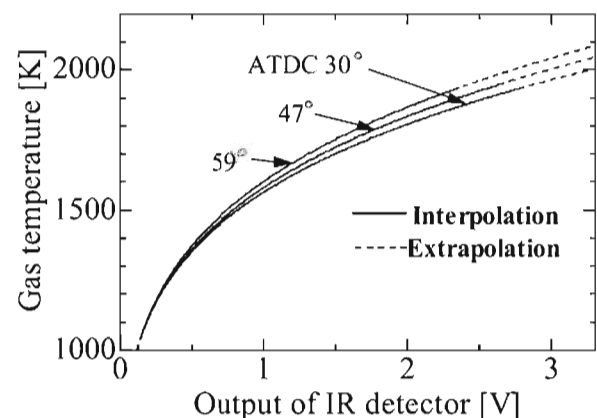


図3 校正曲線

ツケルの単純な2組の熱電対であり、S45C母材の表面にニッケルメッキを施すことによりが母材表面に接点を形成している。表面接点は薄膜状に形成されているため、瞬間的な温度変化に十分な応答性がある。

なお、薄膜型熱電対は図4の赤外線計測位置と同じ位置に設置し壁面温度を計測した。

(3) 熱流束計測装置

本研究で製作し使用した熱流束計の基本構造は銅とコンスタンタンの単純な2組の熱電対であり、熱流束計表面、熱流束計内部の2点に形成された熱電対より温度を計測し2点の温度から熱流束を算出している。表面接点は薄膜状に形成され瞬間的な温度変化に十分な応答性がある。

各計測実験の条件を表2に示す。計測位置は各計測において吸気バルブ側と排気バルブ側の2箇所で行った。

3.2 ガス温度計測結果

赤外線検出器より計測した出力電圧を校正式に適用させ ATDC30°、47°、59°のガス温度を算出した。図5に3点のガス温度と、圧力計より算出した平均ガス温度を示す。3条件とも平均ガス温度と壁面近傍ガス温度の温度差は100K程度であり圧力計より算出した平均ガス温度と近い結果となっている。

また、図6に壁面温度計測結果、図7に熱流束計測結果を示す。

4. 考察

4.1 ガス温度補間

今回行った壁面ガス温度計測では、校正実験を行った3条件のクランク角度条件でしか適用できず、他のクランク角度のガス温度を計測するためにはそのクランク角度に対応した校正実験を行う必要がある。すべての角度につい

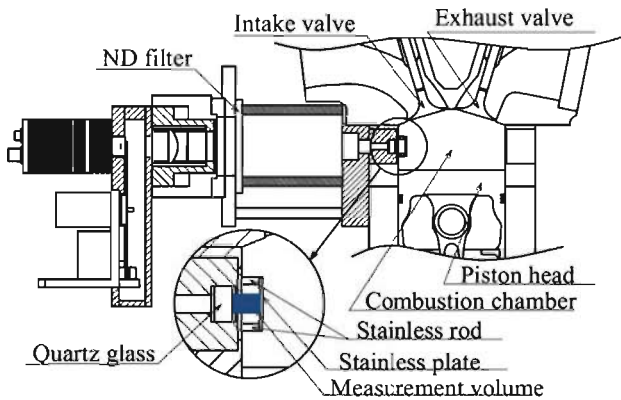


図4 ガス温度計測実験概略図

表1 供試機関諸元

Engine type	4stroke・gasoline
Cylinder number	Single cylinder
Combustion chamber configuration	Pent roof type
Valve mechanism	SOHC Intake valve×1 Exhaust valve×2
Bore×stroke	φ79.0mm×71.2mm
Stroke volume	349cc
Compression ratio	3.61
Lubrication system	Dry sump

表2 実験条件

Engine speed	1000rpm
Charging efficiency	56%
Ignition timing	15
Charge temperature	70°C
Oil temperature	60°C

て対応させるためには何通りもの条件で校正実験を行う必要があり、すべてを対応させることは困難である。

そこで、赤外線放射量が計測体積内ガスの分子数に比例すると考えられることからクランク角度毎の計測体積内に含まれるモル数の比から3条件以外の校正式を予想する。計測体積内のガス分子のモル数 n は

$$n = \frac{m}{M} = \frac{m_{au}V_c}{V_\theta M} \tag{4-1}$$

m : 計測体積内のガス質量 M : 分子量
 m_{au} : 燃焼室内のガス質量 V_c : 計測体積
 V_θ : 特定のクランク角度におけるシリンダ容積

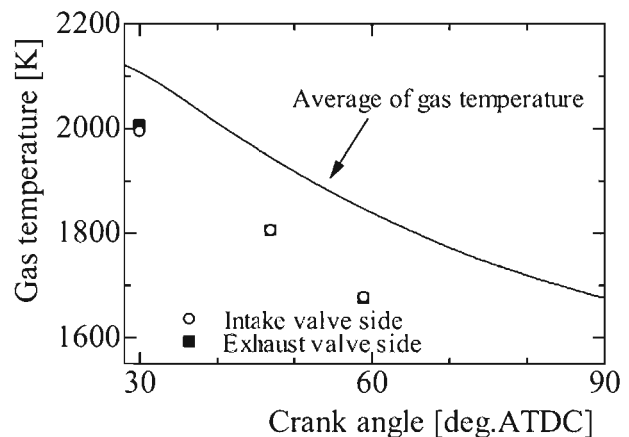


図5 ガス温度計測結果

校正実験で校正した条件でのモル数を、新たに作成する校正条件でのモル数を n_x とし出力電圧も同じようにとすればモル数の変化量と電圧の変化量が比例することから次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} E_x &= E_1 - \frac{(n_1 - n_x)(E_1 - E_2)}{n_1 - n_2} \\ &= E_1 - \frac{\left(\frac{1}{V_{\theta 1}} - \frac{1}{V_{\theta x}}\right)(E_1 - E_2)}{\frac{1}{V_{\theta 1}} - \frac{1}{V_{\theta 2}}} \end{aligned} \quad (4-2)$$

n_1, n_2 : ATDC30°、59°におけるモル数

E_1, E_2 : ATDC30°、59°における出力電圧

$V_{\theta 1}, V_{\theta 2}$: ATDC30°、59°における燃焼室体積

E_x : 特定のクランク角度における出力電圧

$V_{\theta x}$: 特定のクランク角度における燃焼室体積

式(4-2)よりクランク角度毎の体積で赤外線出力を算出できる。確認のために、30°、59°の条件を用いて47°の校正曲線を算出すると図8に示される結果となった。

実験結果と予測結果を比較すると、予測結果が5K程度高くなっているが、計測誤差に含まれるため問題はない。

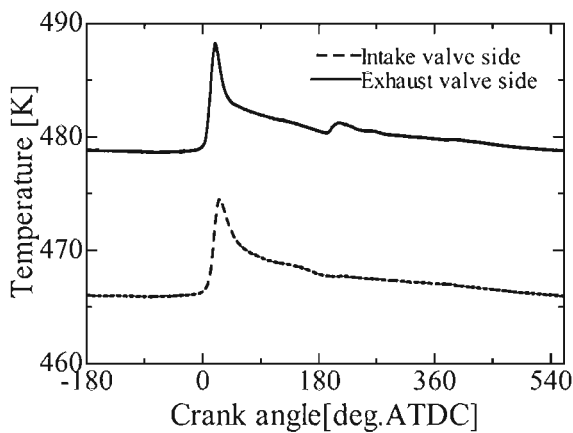


図6 壁面温度計測結果

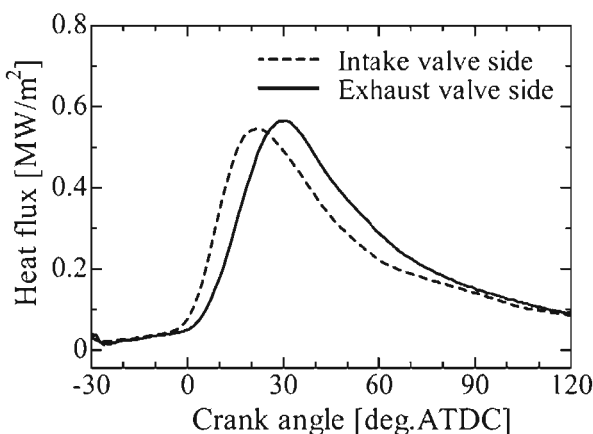


図7 熱流束計測結果

よって2条件の校正結果と式(4-2)より2条件間のクランク角度において校正式を補間することができる。補間した壁面近傍のガス温度を図9に示す。

ATDC30°付近では平均ガス温度との差は約100K程度、ATDC59°付近では150K程度であった。図9に示すように、圧力計より算出した燃焼ガス温度と近くなっていた。これは、燃焼室内では旋回流が発生しているためであると考えられる。今回の計測結果は壁面近傍のガス温度を計測していることと、ステンレス板で計測体積を制限したことで温度境界層の影響を受けていることが考えられる。温度境界層が存在することにより、ガス温度は実際の温度よりも低い温度になっていることが考えられ正確な計測ができていない可能性がある。そのため、温度境界層の影響について調査した。燃焼ガスの熱が、燃焼室壁面とステンレス板へと逃げる際、熱伝導により温度が伝達されると仮定すると温度境界層部では壁面近傍ガスの熱伝導率に比例して熱が伝達される。そこで、温度境界層厚さと熱伝導率を算出することで、壁面近傍ガス温度より低いと考えられる温度境界層内のガス温度の影響を除去した壁面ガス温度を予測した。

4.2 温度境界層を考慮したガス温度

温度境界層の影響を除去した壁面ガス温度を算出した。以下に算出方法を示す。熱伝達率 α は下式となる。

$$\alpha = \frac{q}{T_g - T_w} = \frac{\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}}{T_g - T_w} \equiv \frac{\lambda_T}{\delta_T} \quad (4-3)$$

よって温度境界層厚さは以下の式より算出することができる。

$$\delta_T = \frac{\lambda_T (T_g - T_w)}{q} \quad (4-4)$$

ただし、 T_g は圧力計より算出したガス温度、 T_w は熱電対温度計により計測した壁面温度、 q は熱流束計により計

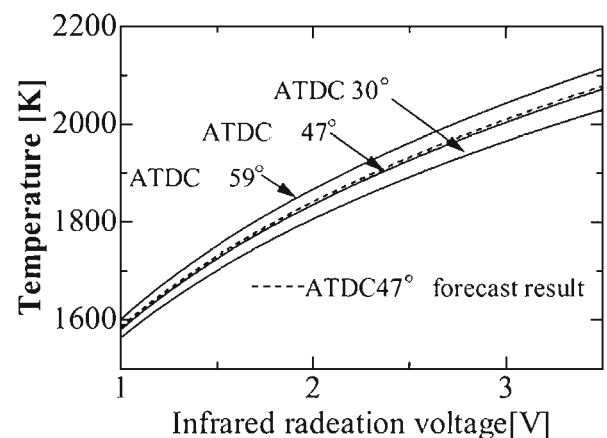


図8 校正曲線補間結果

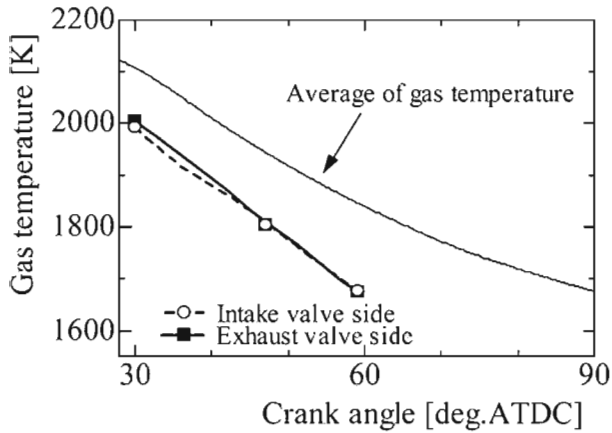


図9 ガス温度補間結果

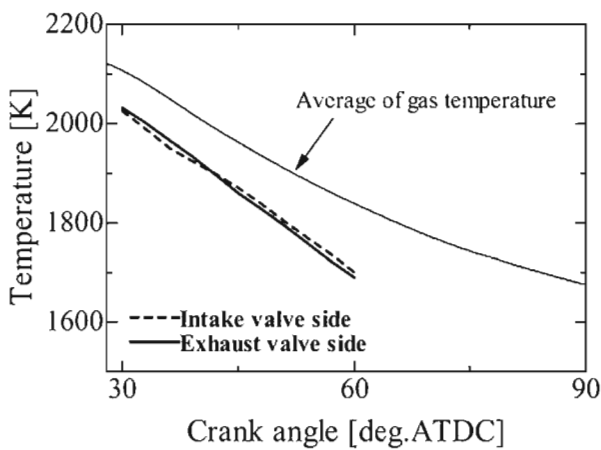


図10 温度境界層の影響を考慮したガス温度

測した熱流束、 λ_T は燃焼ガスの熱伝導率であり、空気と同じであるとして空気の熱伝導率を算出して用いている。温度境界層のガス温度は壁面温度と平均ガス温度との平均温度であるとして推測した壁面ガス温度を図10に示す。壁面ガス温度と平均ガス温度は同程度の温度を示してい

る。燃焼室内には旋回流が発生し乱流となっているため、さらに燃焼室内部では温度が均一となり平均ガス温度に壁面ガス温度が近くなったと考えられる。このことから、熱伝達率の算出の際に圧力より求めた平均ガス温度を用いても問題ないと考えられる。

5. 結論

本研究では赤外線検出器を用いたエンジン壁面のガス温度計測を行い、以下の結論を得た。

- 1) エンジンの燃焼状態を定容燃焼容器内で再現して温度校正を行い、温度校正方法を確立した。
- 2) 赤外線放射量が計測体積内のガス分子の数に比例することを利用して、2条件の校正式で他の条件の校正式を補間できる。
- 3) エンジン燃焼室壁面近傍のガス温度計測を行った。今回のエンジンの運転条件では、計測した壁面近傍のガス温度は圧力より算出したガス温度と近く、これは、熱伝達率の算出の際に平均ガス温度を用いても問題ないことが考えられる。

参考文献

- 1) 円山重直, 光エネルギー工学, 養賢堂, pp.178-179, 2004
- 2) 棚澤一郎, 伝熱研究における温度測定法, 養賢堂, p.126, 1985
- 3) 下間照男ほか16名, 温度計測, 温度計測部会編, 社団法人計測自動制御学会, p.181, p.188, 1981